EL SOL: NUESTRA ESTRELLA, NUESTRA ENERGÍA

Rafael Bachiller

Observatorio Astronómico Nacional
Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento

Abstract

Beyond its purely astronomical importance, the Sun is of great interest these days as it is considered to be a practically never-ending source of energy. Specifically, insolation data are particularly important for the planning of photovoltaic solar plants. This article describes, from the viewpoint of the astronomer, what the Sun is and how it works, how it was formed and how long it will last. We emphasize the origin of solar energy and the amount of it that we receive on Earth.

Introducción

La creciente demanda de energía en nuestro mundo hace que el hombre mire al Sol con nuevos ojos: como una fuente aparentemente inagotable de energía que puede cubrir todas nuestras necesidades. El Sol se nos revela ahora como una fuente de energía que puede ser explotada por la Humanidad de manera mucho más eficaz y exhaustiva de lo que lo es en la actualidad.

En efecto, directa o indirectamente, el Sol es la fuente primaria de toda la energía en la Tierra. La luz solar hace vivir a todos los organismos en nuestro planeta. Esta misma radiación solar, asimilada en la fotosíntesis, se transforma en plantas, y las plantas son el alimento básico de muchos animales. La descomposición de las plantas y de otros seres vivos hace millones de años que almacenó la energía solar en forma de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). El Sol es también la causa de muchos

otros fenómenos energéticos en la Tierra, como los vientos atmosféricos o las corrientes oceánicas. La energía nuclear generada en la Tierra tiene su origen en los elementos pesados que se crearon bien en el centro del Sol o de alguna otra estrella. La propia Tierra, junto con los otros planetas del Sistema Solar, no es más que un producto, en cierto modo "secundario", creado durante la formación del Sol.

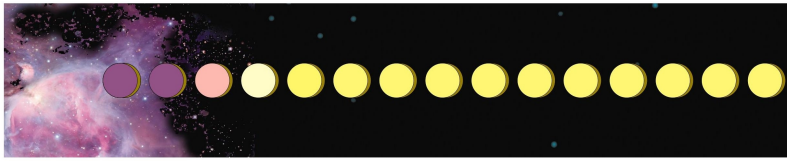


Figura 1: Representación de la evolución del Sol desde su formación en una nube interestelar, pasando por la fase de secuencia principal...

El Sol: una estrella banal

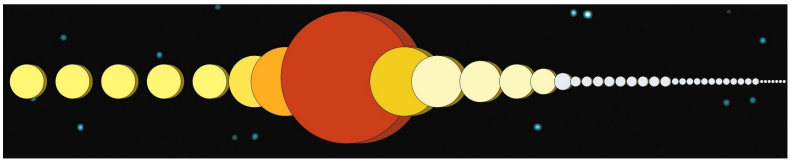
El Sol parece ser una estrella anodina situada en una galaxia anodina. En términos astronómicos, el Sol se clasifica como una estrella de tipo espectral G2 y clase de luminosidad V: una estrella "G2V". Esto es una manera rápida de decir que es una estrella enana y amarilla, con temperatura superficial de 5 780 K[1], compuesta esencialmente por Hidrógeno (74 % en masa y 92 % del volumen) y Helio (24,5 % en masa y 7 % del volumen), a lo que se añaden pequeñas trazas de elementos pesados como Hierro, Níquel, Oxígeno, Silicio, Azufre, Magnesio, Carbono, Neón, Calcio y Cromo.

El Sol está situado en una región que no parece tener nada de especial: a unos 26 000 años luz del centro de la Galaxia (que tiene un radio de unos 60 000 años luz), en el borde interno del brazo espiral de Orión. En la Galaxia, el Sol se mueve a una velocidad de 214 km s^{-1}, lo que le permite recorrer una distancia de un año luz cada 1 400 años. Hay unos 200 mil millones de estrellas en nuestra Galaxia, la Vía Láctea, de las que más de 100 millones son de tipo G2, y aunque la mayor parte (85 %) de esas estrellas son enanas rojas, menos brillantes que el Sol, nuestro Sol es un millón veces menos luminoso que las estrellas más luminosas de la Vía Láctea. Y nuestra Galaxia no es más que una galaxia media de los miles de millones del Universo observable. Así pues, desde el punto de vista astronómico, el Sol es una pequeña estrella perdida en una galaxia banal.

Pero, para la Tierra y para nosotros sus habitantes, el Sol es una estrella única: nuestra estrella. Durante el día, el Sol hace palidecer a los otros cuerpos celestes, su brillo cegador no nos permite mirarlo directamente. El Sol

[1] El Kelvin (K) es la unidad de temperatura que tiene el punto cero en –273 grados Celsius, el cero absoluto

ha sido objeto de curiosidad y estudio para todas las civilizaciones. Muchas comunidades antiguas lo consideraban un dios y le dedicaron monumentos y observatorios. En Egipto, en Grecia, en América, en el Extremo Oriente, en todo el mundo podemos encontrar innumerables ejemplos y curiosidades que ilustran la fascinación y el reconocimiento de la luz y calor proporcionados por el Sol como fuente de vida y energía.



...hasta su transformación en gigante roja y posterior ocaso como enana blanca (dibujo de F. Martín, OAN).

Aunque para el astrónomo el Sol parece una estrella anodina, como tantas otras, es muy difícil encontrar estrellas exactamente gemelas del Sol. Para algunas aplicaciones astrofísicas (calibración) tales gemelos resultan importantes pues el Sol, aunque es el patrón para ciertas medidas, está demasiado cerca y es demasiado brillante para calibrar nuestros instrumentos. Búsquedas cuidadosas de estrellas idénticas al Sol han dado resultados poco satisfactorios. Hasta ahora, las estrellas que se consideran más parecidas al Sol son 18 Scorpii (HD142633) e HIP56984 (artículo de Meléndez y Ramírez, 2007, The Astrophysical Journal 669, L89). 18 Sco es similar al Sol en muchos aspectos, pero difiere en otros, por ejemplo tiene una abundancia de litio que es 3 veces superior a la solar. HIP56984, sin embargo, parece idéntica al Sol dentro de las precisiones de las medidas. Esta estrella, situada a unos 200 años luz de distancia de nuestro Sol, tiene la misma edad que nuestra estrella y es por tanto un candidato excelente para la búsqueda de planetas similares a la Tierra. Si se encontrasen indicios de tales planetas, éstos serían candidatos privilegiados para emprender la búsqueda de vida extraterrestre.

Origen y evolución del Sol

El mecanismo por el que se formó el Sol fue objeto de un artículo previo en este Anuario (Mario Tafalla, *Cómo nació el Sol?. Formación de estrellas de tipo solar*, Anuario del Observatorio Astronómico 2002). Tal y como se refiere en ese artículo, el Sol es una estrella de tercera generación que se formó hace unos 4 600 millones de años, es decir cuando el Universo tenía unos 9 000 años de edad (su edad actual es de 13 600 millones de años). Las teorías más avanzadas sobre la formación estelar nos enseñan que el Sol se

formó en una región particularmente densa de una nube interestelar. Estas nubes, que abundan en nuestra Galaxia, están formadas por gas y polvo (pequeñas partículas de material en estado sólido). La fuerza de la gravedad (el propio peso de la nube) hizo que en un determinado momento la nube comenzase a contraerse. Para alcanzar las densidades típicas observadas en las estrellas, una nube interestelar ha de comprimirse 20 órdenes de magnitud (es decir por un factor 10^{20}). Si la nube inicial fuese más o menos esférica, el radio de dicha esfera hubo de hacerse un millón de veces más pequeño en su proceso de formación del Sol.

Es la fuerza de la gravedad, pues, el motor de la formación estelar, la causa de las altas densidades alcanzadas en el centro del Sol, y el mecanismo mediante el que se desencadenarán allí las reacciones nucleares. Durante el colapso gravitatorio, la parte del material que está animada de un pequeño movimiento de rotación, no cae directamente sobre el proto-Sol sino que forma un disco que gira en torno al objeto central. De la misma manera que un patinador gira más y más aprisa según recoge sus brazos, la materia de ese disco acelera su rotación según se acerca hacia el centro. Según pasa el tiempo, el material de este disco se va aglomerando en objetos sólidos (planetesimales) que tras irse combinando en objetos mayores acaban dando lugar a un conjunto de planetas: el Sistema Solar.

En una estrella como el Sol, se estima que tras unos 30 millones de años de contracción gradual, la temperatura y la densidad centrales alcanzan los valores necesarios para que comience la fusión nuclear (la conversión de hidrógeno a helio). El inicio de la fusión marca el comienzo de la edad madura, lo que en términos de los astrónomos conocemos como la llegada a la Secuencia Principal. Esta fase será la más larga en la vida de nuestra estrella, pues el hidrógeno (el 70 % de la masa total) es suficiente como para alimentar el reactor nuclear durante unos 10 000 millones de años. Pero una vez agotado este combustible, el Sol deberá sufrir unos reajustes estructurales muy dramáticos que lo llevarán a una fase de gigante roja (una estrella grande y brillante pero relativamente inestable). Tras una nueva (pero corta) fase de estabilidad en la que el helio será el combustible nuclear que contrarrestará la fuerza de la gravedad mediante su conversión a carbono, el Sol sucumbirá a la gravedad y se convertirá en una estrella enana blanca (prácticamente inerte), perdiendo en estos procesos (en forma de explosiones y eyecciones diversas) una buena proporción de su masa.

Así genera el Sol su energía

Se dice a menudo que el Sol es una esfera de gas en ebullición. En concreto, la zona más interna del Sol, es decir la que abarca desde el centro hasta unos 0,2 radios solares, se encuentra a una temperatura muy elevada (hasta 15 millones de grados) y constituye, de hecho, un inmenso reactor nuclear. Como hemos mencionado, las tres cuartas partes de la masa del Sol

están constituidas por átomos de hidrógeno. En la zona central del Sol, los átomos de hidrógeno fusionan para formar átomos de helio. El helio es un gas noble que fue detectado en el Sol antes de ser descubierto en la Tierra, de ahí proviene su nombre: de Helios, un dios solar de la antigua Grecia. Mediante una cadena de reacciones nucleares conocida como cadena p-p (protón-protón), cada cuatro átomos de hidrógeno dan lugar a uno de helio. Pero en la conversión de hidrógeno a helio hay una pequeña fracción de masa (un 0,7 %) que se convierte en energía de acuerdo con la fórmula de Einstein $E = mc^2$.

Cada segundo en el interior del Sol unos $3{,}4 \times 10^{38}$ protones se convierten en núcleos de helio, generándo unos $3{,}86 \times 10^{26}$ Watios. Dicho de otro modo, cada segundo unos 580 millones de toneladas de gas hidrógeno se convierten en helio, consumiéndose unos 5 millones de toneladas para producir unos 90 000 millones de megatones de energía pura. Para comparación digamos que una bomba nuclear tiene típicamente varios megatones o decenas de megatones.

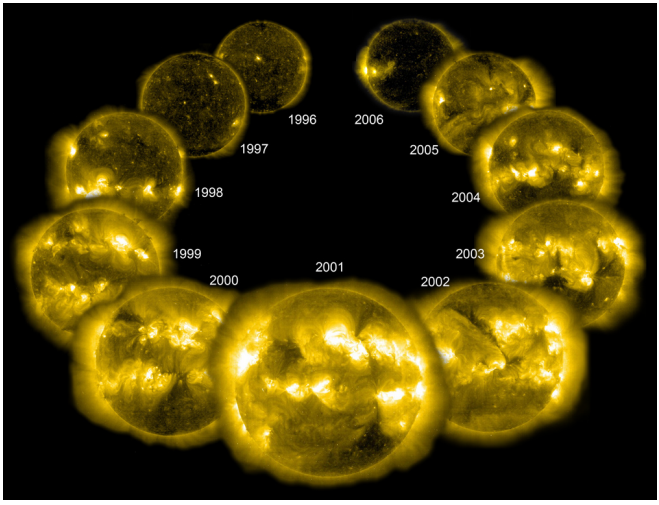


Figura 2: El telescopio espacial SOHO tomó imágenes del Sol, en el extremo ultravioleta, durante uno de sus ciclos completos de actividad de 11 años. El máximo sucedió en 2001 y los mínimos en 1996 y 2007. Cortesía: SOHO (consorcio EIT), ESA y NASA.

El Sol, según va produciendo energía nuclear, va perdiendo masa. Tal y como hemos visto, pierde 5 millones de toneladas de masa cada segundo. Pero, sin embargo, la luminosidad solar permanece muy constante. Las medidas indican que las variaciones de la luminosidad del Sol están por debajo

del 1 % (ni siquiera se ha apreciado una variación significativa con el ciclo de 11 años de las manchas solares). Aunque la potencia nuclear generada en el Sol es enorme, conviene señalar que la eficiencia en generación de energía por unidad de volumen o de masa es muy pequeña: tan sólo de unos 0,3 $\mu W\ cm^{-3}$ (microWatios por centímetro cúbico), o unos 6 $\mu W\ kg^{-1}$. Para orientación, esto puede ser comparado con el cuerpo humano que produce unos 1,2 $W\ kg^{-1}$, es decir que es varios millones de veces más eficaz. Un reactor artificial de fusión nuclear en la Tierra, para ser eficaz debe trabajar con plasma a temperaturas mucho más elevadas que las que se encuentran en el interior solar.

Como consecuencia del déficit de masa que tiene lugar en la transformación de hidrógeno en helio, las reacciones nucleares generan radiación de alta energía. Los fotones que componen esta radiación son absorbidos y reemitidos muchas veces a lo largo de la trayectoria que recorren desde el centro del Sol. Se estima que la escala de tiempo para que la radiación recorra la parte más densa del Sol (entre 0,2 y 0,7 radios solares) está entre 10 000 y 200 000 años. Esta zona se denomina zona radiativa, pues en ella la energía se transmite mediante absorciones y re-emisiones sucesivas de la radiación. Sin embargo, a una distancia del orden de 0,7 radios solares desde el centro, la densidad y la temperatura no son suficientemente altas como para continuar la transferencia de energía mediante radiación. En esa región comienza a operar la convección térmica: el material caliente -menos denso- emerge a la superficie donde se enfría y vuelve a caer a la base de la zona de convección. Se forman grandes células de convección que pueden ser observadas como la estructura granulada de la superficie solar. Así pues, contrariamente a lo que pensaba Anaxágoras, el Sol no es una piedra incandescente sino, como adelantábamos al principio de este apartado, el Sol es una esfera de gas cuya zona exterior se encuentra literalmente en ebullición.

La fotosfera, o superficie visible del Sol, es la capa en la que los fotones encuentran hueco libre para viajar por el espacio. Tiene un espesor de unos 100 km, una temperatura de unos 5 800 K y una densidad relativamente baja, unas 10^{23} partículas por cm^3, tan sólo un 1 % de la densidad de la atmósfera terrestre a nivel del mar. Por encima de la fotosfera se extiende un gas tenue conocido como *atmósfera solar* que está compuesto por capas, según nos alejamos del centro: la cromosfera, la corona y la heliosfera.

Fenómenos de la superficie solar: manchas solares y fulguraciones

El material ionizado que circula por el globo solar forma una complicada red de corrientes eléctricas que son, a su vez, origen de campos magnéticos. La rotación y los movimientos ascendentes y descendentes de la convección hacen que las líneas magnéticas se compriman en ciertos puntos y

se estiren en otros. A veces las líneas magnéticas atraviesan la superficie del Sol formando bucles en los que las líneas de fuerza emergen en una zona con polaridad positiva y se sumergen en otra zona con polaridad negativa. Por los efectos de los campos magnéticos, estas regiones de la fotosfera son más frías y, por lo tanto, más oscuras, apareciendo como "manchas" en la fotosfera. Típicamente la zona más umbría de las manchas se encuentra a unos 4 200 K (a comparar con los 5 800 K a los que se encuentra la fotosfera). Las manchas suelen aparecer por pares (una positiva junto a una negativa) y por grupos que suelen permanecer visibles durante varias semanas. Naturalmente, las manchas solares son una medida fácil y directa de la actividad solar. Para estimar y tabular de manera sencilla esta actividad se utiliza el número de Wolf: una expresión que combina el número de manchas individuales y el de grupos de manchas.

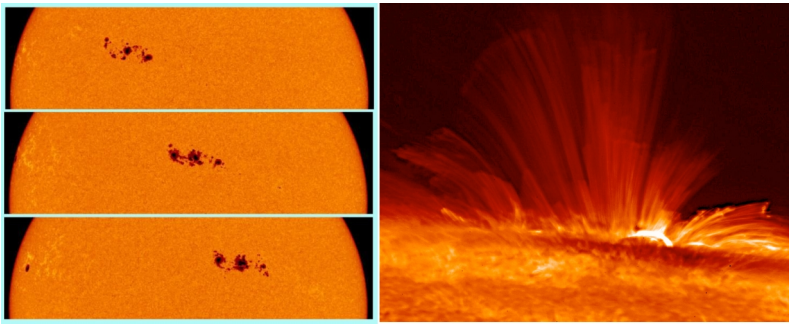


Figura 3: En la imagen izquierda el *Grupo 30* de manchas solares observadas cerca de un máximo de actividad solar por el telescopio espacial SOHO. La derecha muestra la imagen detallada de una mancha solar vista de perfil tomada por el telescopio espacial japonés HINODE. Cortesía SOHO, ESA, NASA, HINODE, JAXA.

El número de manchas solares (el número de Wolf) ha sido medido sin interrupción desde principios del siglo XVIII, pero hay estimaciones sobre cómo ha variado el número de manchas durante los últimos 10 000 años. Se observa que la actividad solar pasa por máximos y mínimos de manera periódica. La duración de este ciclo principal es de 11 años, pero a éste se superpone otro ciclo de unos 80 años. Sin embargo, el efecto de estos ciclos sobre la luminosidad total del Sol es muy pequeño. Las fluctuaciones de la intensidad apenas representan un 0,1 % de la luminosidad total del Sol, por lo que se considera que los efectos sobre la Tierra deben ser poco importantes, aunque éste es aún un tema de estudio.

Asociadas con el fenómeno de las manchas solares, se pueden observar inmensas protuberancias emergiendo de la superficie solar. Se trata de

columnas de material ionizado y a muy alta temperatura (de color rojo profundo) que pueden alcanzar alturas cercanas al millón de kilómetros. Por efecto de los campos magnéticos, frecuentemente las protuberancias se curvan para formar arcos o bucles, por encima de las grandes manchas, que pueden durar varios días.

Las inestabilidades de los campos magnéticos pueden dar origen a grandes explosiones en la fotosfera. Estas explosiones, conocidas como fulguraciones, provocan una intensa emisión de rayos X y gamma y la eyección de un viento de partículas de muy alta energía. Cuando al cabo de unas horas esta lluvia de partículas alcanza la Tierra, se produce una serie de fenómenos asombrosos: las telecomunicaciones se alteran debido a los efectos ocasionados en las capas superiores de la atmósfera y las perturbaciones en el campo magnético terrestre pueden desorientar a nuestros instrumentos de medida (brújulas y derivados) e incluso a las palomas mensajeras. Esta interacción de las eyecciones solares con el campo magnético terrestre es también la causa de las auroras boreales.

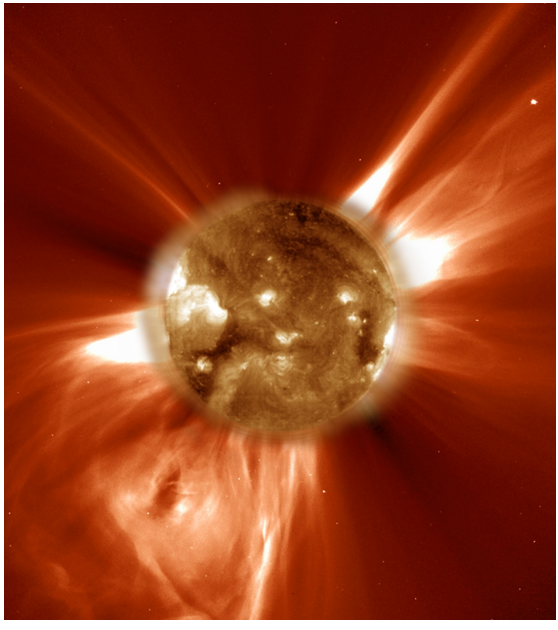


Figura 4: Eyecciones de la superficie activa del Sol observadas por SOHO en el año 2002. La luz del disco solar ha sido bloqueada y su imagen ha sido reemplazada con una imagen ultravioleta tomada simultáneamente. Cortesía SOHO, ESA, NASA.

Telescopios Solares

Los astrónomos han diseñado telescopios e instrumentos específicos para la observación detallada del Sol. Desde principios del siglo XIX, los espectrógrafos han servido para analizar cuidadosamente el espectro solar, lo que permite obtener su composición química. El espectroheliógrafo es un instrumento que nos ofrece imágenes monocromáticas (filtrando un estrecho rango de frecuencias). El coronógrafo oculta de manera artificial la fotosfera (produce una especie de eclipse artificial) para estudiar la corona. La mejor batería actual de telescopios solares se encuentra en territorio nacional, concretamente en el Observatorio internacional del Teide (dependiente del Instituto de Astrofísica de Canarias). Y los telescopios montados en plataformas espaciales han podido proporcionar una información muy detallada del Sol, sin el efecto pernicioso introducido por la atmósfera terrestre en las observaciones. Entre estas misiones hay que destacar el Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), un telescopio fruto de la colaboración entre las agencias espaciales europea (ESA) y norteamericana (NASA) que viene observado cuidadosamente el Sol desde hace unos doce años. Algunas de las imágenes que ilustran este artículo proceden de observaciones realizadas con SOHO.

Figura 5: El observatorio internacional del Instituto de Astrofísica de Canarias en Izaña (Sta. Cruz de Tenerife) alberga la mejor batería de telescopios solares del mundo. Foto: Miguel Briganti, SMM del IAC.

Energía solar en la Tierra

El Sol no sólo emite energía en el rango óptico (visible). El espectro (la distribución por frecuencias) de la radiación solar es similar al de un cuerpo negro (un cuerpo ideal que absorbe toda la radiación que llega sobre él sin reflejar nada, una fuente ideal de radiación térmica) a una temperatura de unos 5 800 K. Por tanto, hay tanta energía emitida por el Sol en el visible

como en el resto del espectro, principalmente en el infrarrojo cercano con una pequeña contribución en el ultravioleta.

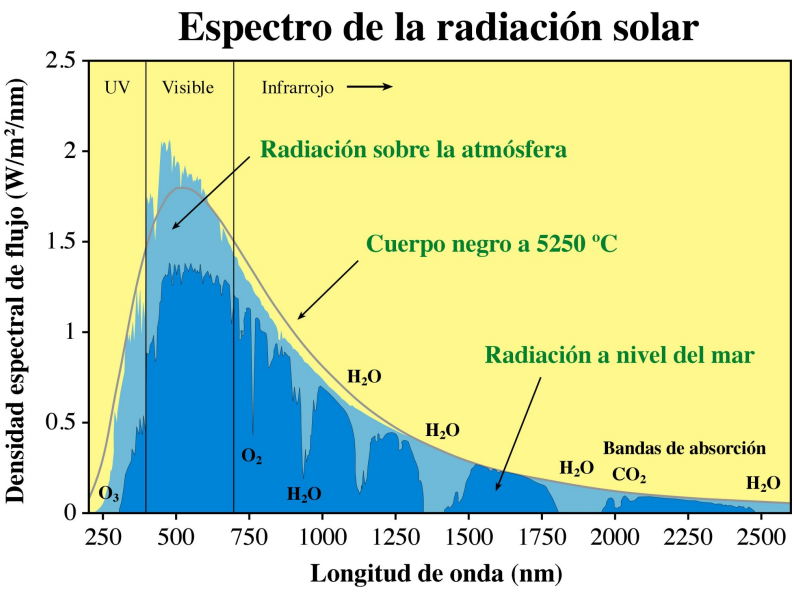


Figura 6: Espectro de radiación solar. Tras la dispersión y absorciones en la atmósfera, la radiación que alcanza el nivel del mar está muy disminuida en el ultravioleta y presenta un exceso en el azul.

Como hemos señalado anteriormente, el Sol emite al espacio (en todas las direcciones) unos $3{,}86 \times 10^{26}$ Watios. El ángulo sólido subtendido por la Tierra, cuando se observa desde el Sol, es de unos $1/140\,000\,000$ estereoradianes. Por lo tanto, la potencia de la radiación solar electromagnética por unidad de superficie que alcanza la atmósfera de la Tierra es de unos 1 370 W m^{-2} (Watios por metro cuadrado de la superficie perpendicular a los rayos del Sol). Esta cantidad recibe el nombre de constante solar. A veces se expresa como 1,96 Ly min^{-1} (donde Ly representa 1 Langley, es decir, una caloría por cm^2). Sin embargo, este parámetro no es realmente constante, su fluctuación alcanza el 7 % entre enero y julio (según la superficie de la Tierra está más lejos o más cerca del Sol debido a su órbita elíptica). La constante solar representa, por tanto, un valor medio calculado a lo largo del año. La intensidad de la radiación solar recibida en la Tierra también varía con la latitud del lugar, además de con las estaciones. A latitudes de unos 30º, la insolación diurna (acumulada en el día) varía de unos 470 Ly en invierno a casi 1 000 Ly en verano, y la insolación anual (acumulada en el año) alcanza un valor de unos 280 000 Ly.

La atmósfera terrestre atenúa la radiación solar y sólo unos 1 000 W m^{-2} alcanzan el nivel del mar en un día claro (para una superficie perpendicular a los rayos). Si se tiene en cuenta el ángulo con que inciden los rayos, la trayectoria recorrida por la radiación en la atmósfera, la absorción y la difusión atmosféricas, y la duración del día, resulta que la insolación media de la superficie de la Tierra (ignorando nubes) es de unos 250 W m^{-2}. Esto también puede expresarse como 6 kWh m^{-2} por día. A latitudes de unos 30º, la insolación diurna atenuada varía de unos 200 Ly en el solsticio de invierno a unos 600 Ly en el de verano, y la insolación anual atenuada es de unos 150 000 Ly.

Los números descritos aquí, que tienen un origen puramente astronómico, son los que se utilizan para calcular el tamaño y rendimiento de las plantas de energía solar. Junto con el rendimiento de los paneles fotovoltaicos, los valores locales de la insolación son los que determinan el rendimiento final de una planta de energía solar.

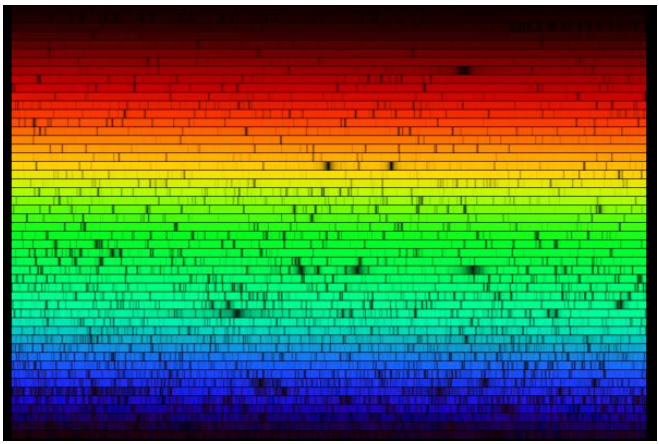


Figura 7: Espectro solar obtenido mediante el paso de luz solar a través de un dispersor similar a un prisma. El Sol emite en todos los colores del espectro visible y diferentes tipos de gas en su atmósfera absorben diferentes radiaciones creando zonas oscuras (líneas de absorción) que permiten conocer su composición química. Cortesía: Nigel Sharp (NSF), FTS, NSO, KPNO, NOAO/AURA/NSF.

Conclusión

El Sol domina de manera abrumadora la práctica totalidad de la actividad sobre nuestro planeta y, naturalmente, debe jugar un papel importante en la satisfacción de las necesidades contemporáneas y futuras

de nuestra civilización en términos de energía. El Sol es, por tanto, un ingrediente esencial en el futuro de la Humanidad.

Como hemos subrayado en este artículo, el Sol parece ser una pequeña estrella perdida en una galaxia anodina. Pero para nosotros el Sol, nuestro astro, es una estrella única e irremplazable. Aunque la Vía Láctea tiene muchas estrellas similares, cuando intentamos buscar gemelos idénticos al Sol, los astrónomos encontramos serias dificultades. Es cierto que aún no sabemos cómo es de especial el Sol, ni cuán único es nuestro Sistema Solar, ni cuán única es la Tierra, pero cuando estudiamos la Galaxia con los medios disponibles hoy día, es inevitable considerar la vida y la civilización terrestre como fenómenos sumamente especiales. El estudio del Sol y el aprovechamiento óptimo de su energía son requisitos indispensables para conservar adecuadamente la Tierra.

Referencias

J. Audouze, G. Israél (Eds.), *Le Grand Atlas d'Astronomie*. Encyclopaedia universalis,1988.
J. Meléndez, I. Ramírez, *The Astrophysical Journal Letters 669*, 2007
J. Kelly Beatty, C. Collins Petersen, A. Chaikin, *The New Solar System*, Cambridge University Press, 1999.
K. R. Lang, *The Cambridge Encyclopedia of the Sun*, Cambridge University Press, 2001.
M. Longair, *La evolución de nuestro universo*, Cambridge University Press, 1998.
J. M. Pasachoff, L. Golub, *Nearest star: the surprising science of our Sun*, Harvard University Press, 2001.
M. Tafalla, *Cómo nació el Sol? Formación de estrellas de tipo solar*, Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid para el año 2002.
J. B. Zirker, *Journey from the Center of the Sun*, Princeton University Press 2002.

http://es.wikipedia.org/wiki/Disco_solar
http://solar-center.stanford.edu/index.html
http://sohowww.nascom.nasa.gov/
http://www.solarviews.com/eng/sun.htm
http://www.nasa.gov/home/index.html
http://www.esa.int/esaCP/Spain.html
http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/sun/sun.html